

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – наземные транспортно-технологические средства и комплексы

Направление – машины, агрегаты и технологические процессы

УДК [UDC] 62-592.6

DOI 10.17816/transsyst20239341-58

© А.Э. Юницкий<sup>1,2</sup>, И.А. Кузьмин<sup>2</sup>, С.С. Попко<sup>2</sup>, И.Е. Лобазова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО «Астроинженерные технологии»

<sup>2</sup>ЗАО «Струнные технологии»

(Минск, Беларусь)

## РАЗРАБОТКА ВИХРЕТОКОВЫХ ЗАМЕДЛИТЕЛЕЙ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ «ВТОРОГО УРОВНЯ» uST

**Обоснование:** В настоящее время перед человечеством остро встают вопросы поиска новых транспортно-инфраструктурных решений – более безопасных, более эффективных и экологически чистых. Одним из возможных путей решения данных задач является перемещение взаимодействующих и ограничивающих друг друга инфраструктурно-транспортных элементов в разные плоскости, в частности, перенос путевых структур и подвижного состава транспортных систем на «второй уровень». При возникновении нештатных ситуаций и при приближении юнимобиля (беспилотного рельсового электромобиля на стальных колесах) к зонам остановки, парковки и вхождении в крутые повороты на высоких скоростях, механическое торможение не всегда может гарантированно обеспечить безопасную остановку рельсового электромобиля в таких погодных условиях как ливень, обледенение пути, а также износ компонентов тормозной системы. Разработанные авторами вихретоковые замедлители (ВТЗ) позволяют решить данную проблему, минимизировав количество продуктов износа, поскольку тормозящая сила возникает за счет взаимодействия магнитных полей, при этом в такой тормозной системе отсутствует механический контакт.

**Цель:** Разработка энергонезависимого ВТЗ, конструкция которого обеспечивает стабильную работу без предъявления повышенных требований к точности позиционирования транспортного средства «второго уровня» uST.

**Материалы и методы:** В статье приводятся исследования образцов вихретоковых замедлителей с шинами из различного материала и компоновкой магнитов. Подтверждение экспериментальных данных проводилось с помощью компьютерной модели ANSYS Maxwell – метода конечных элементов.

**Результаты:** В статье представлены ВТЗ с оптимальным относительным расположением и ориентацией магнитов в сочетании с магнитопроводами, разработанные и рассчитанные методом математического моделирования, подтвержденного натурными испытаниями и экспериментами.

Разработанный ВТЗ (вариант №2) развивает требуемое усилие и, в отличие от ВТЗ (вариант №1) с классической компоновкой магнитной системы, способен работать

при неточном позиционировании юнимобилия как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях.

**Закключение:** Разработанные опытные образцы секций ВТЗ будут использованы в системах пассивной безопасности в качестве энергонезависимого замедлителя подвижного состава в городских, а также в транспортно-инфраструктурных комплексах uST применительно к любым природно-климатическим условиям нашей планеты.

**Ключевые слова:** Общепланетарное транспортное средство (ОТС), магнитное поле, вихревые замедлители, вихретоковое торможение, вихретоковый замедлитель (ВТЗ), транспортные комплексы uST, экваториальный линейный город.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – ground transport and technological means and complexes

Field – machines, aggregates and technological processes

© A.E. Unitsky<sup>1,2</sup>, I.A. Kuzmin<sup>2</sup>, S.S. Popko<sup>2</sup>, I.E. Labazava<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Astroengineering Technologies LLC

<sup>2</sup>Unitsky String Technologies Inc

(Minsk, Republic of Belarus)

## DEVELOPMENT OF EDDY-CURRENT DECELERATORS FOR uST TRANSPORT COMPLEXES OF THE “SECOND LEVEL”

In case of emergency situations and when a uPod (an unmanned electric rail vehicle on steel wheels) approaches the areas of stopping, parking and enters sharp turns at high speeds, mechanical braking cannot always guarantee a safe stop of the electric rail vehicle under such weather conditions as rain, icing of the track, as well as wear of components in the braking system. The eddy-current decelerators (ECD) developed by the authors make it possible to solve this problem by minimizing the number of wear products, since the braking force arises due to the interaction of magnetic fields, while there is no mechanical contact in such a braking system.

**Aim:** Development of a non-volatile ECD, the design of which ensures stable operation without imposing increased requirements on the accuracy of vehicle positioning.

**Materials and Methods:** The article presents studies of samples of eddy current moderators with tires made of various materials and the layout of magnets. Confirmation of the experimental data was carried out using the ANSYS Maxwell computer model - the finite element method.

**Results:** The article presents ECDs with an optimal relative arrangement and orientation of magnets in combination with magnetic cores, developed and confirmed by mathematical modeling, confirmed by field tests and experiments.

The designed ECD (option No. 2) develops the required force and, unlike the ECD (option No. 1) with the classical layout of the magnetic system, is capable to operate at inaccurate positioning of a uPod in both horizontal and vertical planes.

**Conclusion:** The developed prototypes of ECD sections will be used in passive safety systems as an energy-independent rolling stock retarder in urban, as well as in high-speed and hyper-speed transport and infrastructure complexes uST in relation to any natural and climatic conditions of our planet.

**Key words:** General Planetary Vehicle (GPV), magnetic field, vortex decelerators, eddy-current braking, eddy-current decelerator (ECD), uST transport complexes, equatorial linear city.

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальной задачей при разработке струнного транспорта [1], является обеспечение безопасного торможения при возникновении нештатных ситуаций, а также при приближении к зонам остановки, парковки, вхождения в крутые повороты [2]. Авторами статьи разработан опытный образец полномасштабной секции линейного вихретокового замедлителя (ВТЗ), не требующий дополнительной энергии и обеспечивающий работу ВТЗ при неточном позиционировании подвижной и неподвижной частей. Данная инновация может послужить основой для разработки и запуска в производство энергонезависимых систем безопасности.

## АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ

С целью повышения безопасности и во избежание последствий возможного отказа механических систем торможения, авторами предложено использование вихретоковых замедлителей, имеющих широкую перспективу применения и ряд потенциальных преимуществ, таких как бесконтактная работа, более быстрое срабатывание, меньшее количество компонентов и простота реализации различных контроллеров.

Однако описанные в литературе ВТЗ имеют и ряд недостатков: так авторами работ [3–4] применяются в качестве дополнительного оборудования приводы, использующие магнитные поля переменного тока с фиксированной и переменной частотой в различных формах волны как на низких, так и на высоких скоростях, что уменьшает надёжность ВТЗ и требует подвода внешнего питания. Авторами [5–7] рассмотрены ВТЗ с использованием компоновки магнитной системы, требующей подачи внешней энергии, что неблагоприятно влияет на экологию окружающей среды. В работах [8–14] предложены ВТЗ, имеющие компоновку магнитной системы с вращающимися частями и линейные ВТЗ, требующие высокой точности относительного расположения своих составных частей.

Как новый тип вспомогательного тормозного устройства юнимобилia, вихретоковый замедлитель с постоянными магнитами имеет широкую перспективу применения, обладая рядом преимуществ:

- плавно нарастающее (безударное) тормозящее усилие;
- отсутствие механически контактирующих деталей и, соответственно, износа, поэтому ВТЗ не загрязняет окружающую среду;
- тормозящее усилие зависит от скорости движения – чем выше скорость, тем больше усилие (до максимального значения усилия) и, соответственно, ускорение торможения, что сокращает тормозной путь;
- торможение является энергонезависимым;
- на величину тормозящего усилия не влияет состояние путевой структуры и природно-климатические условия, такие как дождь, снег, обледенение, жара, холод, пыль, туман и др.;
- длительный срок эксплуатации без обслуживания, который определяется лишь временем жизни магнитов (с последующим повторным намагничиванием или заменой магнитов на новые).

Применение ВТЗ на постоянных магнитах не требует использования внешних источников питания и, следовательно, повышает надежность системы и сокращает энергетические затраты [3].

Концепция применения системы вихретокового замедления заключается в том, что в случае нештатного приближении рельсового электромобилia к зоне с ограничением скорости со скоростью, превышающей номинальную для данного участка, в линейном вихревом замедлителе генерируется тормозящее усилие, замедляющее юнимобилia до номинальной скорости. Конструктивно возможный тормозной путь и величина тормозящего усилия позволяют обеспечить комфортное для пассажиров ускорение торможения [4–6].

В этой связи проведение исследований, связанных с разработкой перспективного опытного образца секции ВТЗ и оценкой его эффективности, является актуальным.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Авторами были исследованы тестовые образцы, отличающиеся материалом шины, наличием магнитопроводов, а также положением и ориентацией постоянных магнитов. Тестирование было проведено на специально разработанном и изготовленном испытательном стенде.

Конструктивно стенд представляет собой электродвигатель (Рис. 1), установленный на несущую раму и оснащенный системой управления оборотами двигателя. На вращающийся вал двигателя крепится диск-шина из исследуемого материала. Магнитная сборка установлена неподвижно с возможностью регулировки воздушного зазора в широком диапазоне.

Также на стенде установлена измерительная муфта для определения развиваемого крутящего момента.

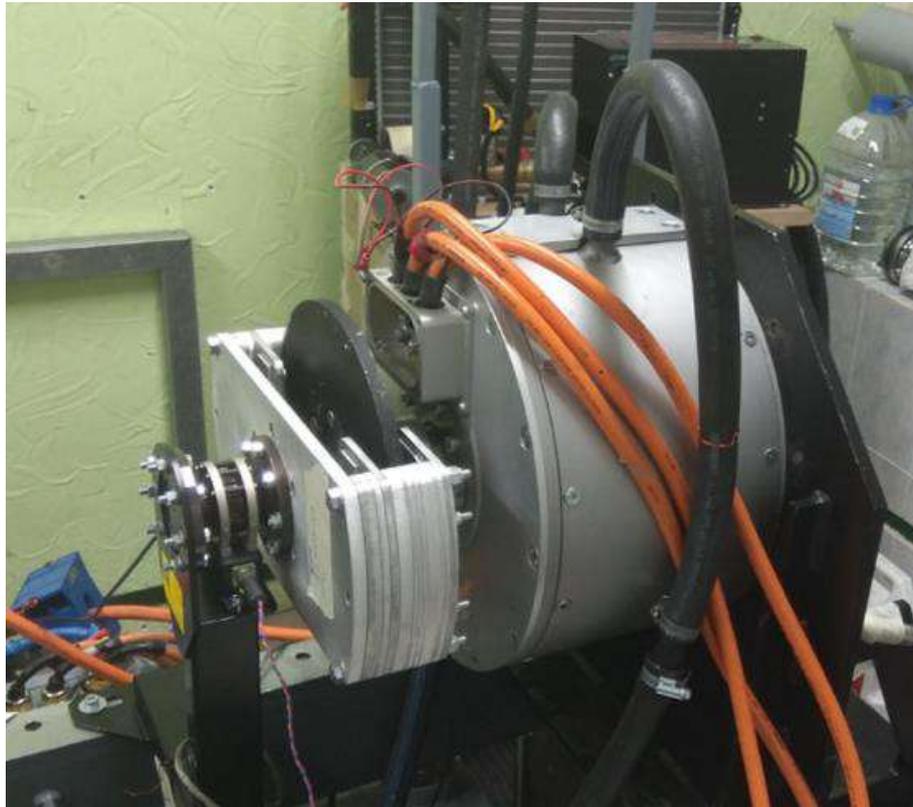
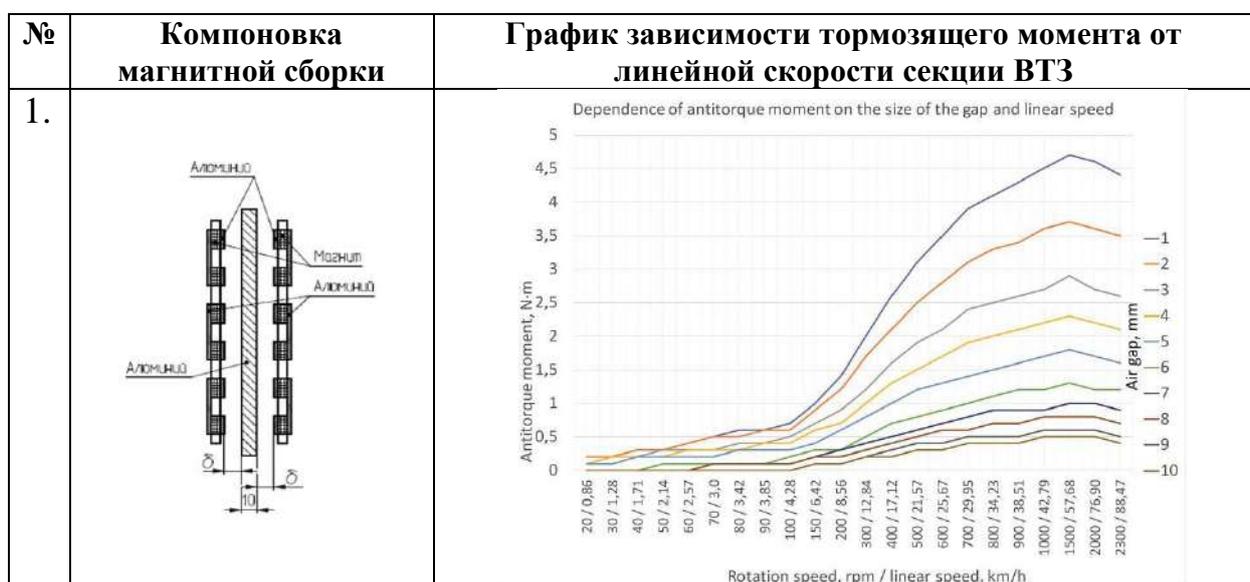
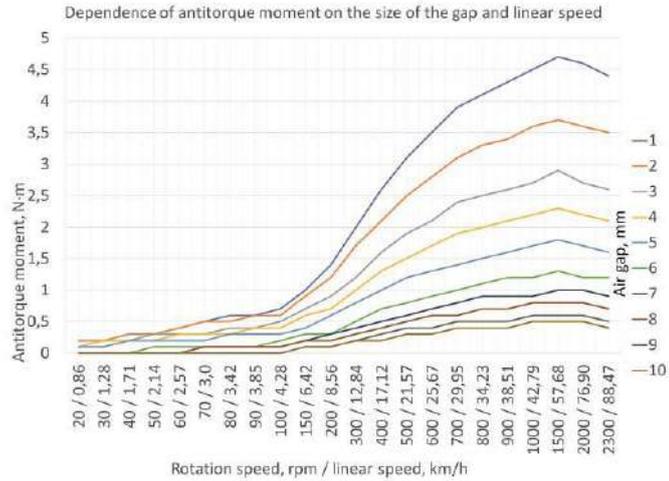
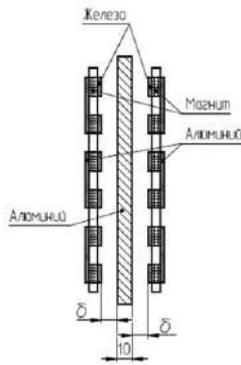


Рис. 1. Испытательный стенд с установленным тестовым образцом ВТЗ с различной компоновкой магнитов

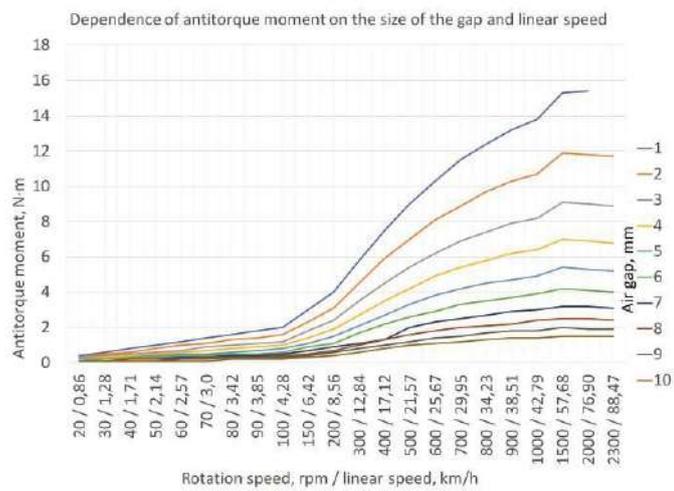
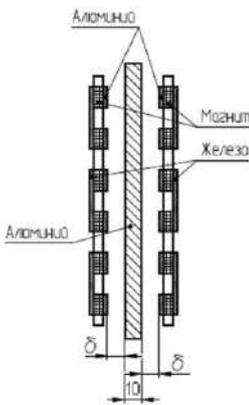
В ходе работы установлены зависимости величины тормозной силы от используемых материалов, конструктива, скоростей, зазоров, температуры и др. параметров для тестовых образцов с оценкой более 10 различных вариантов компоновки магнитной системы (Рис. 2).



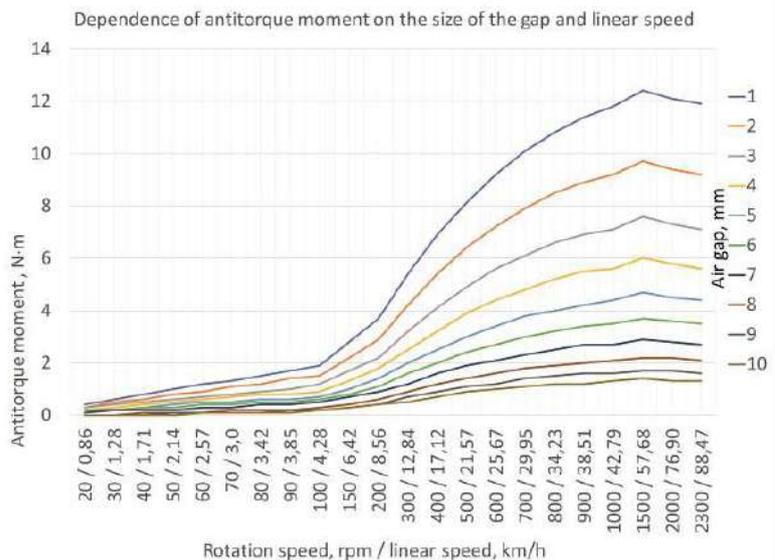
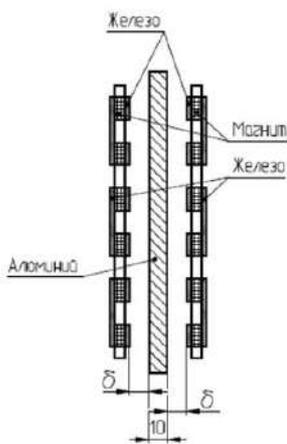
2.

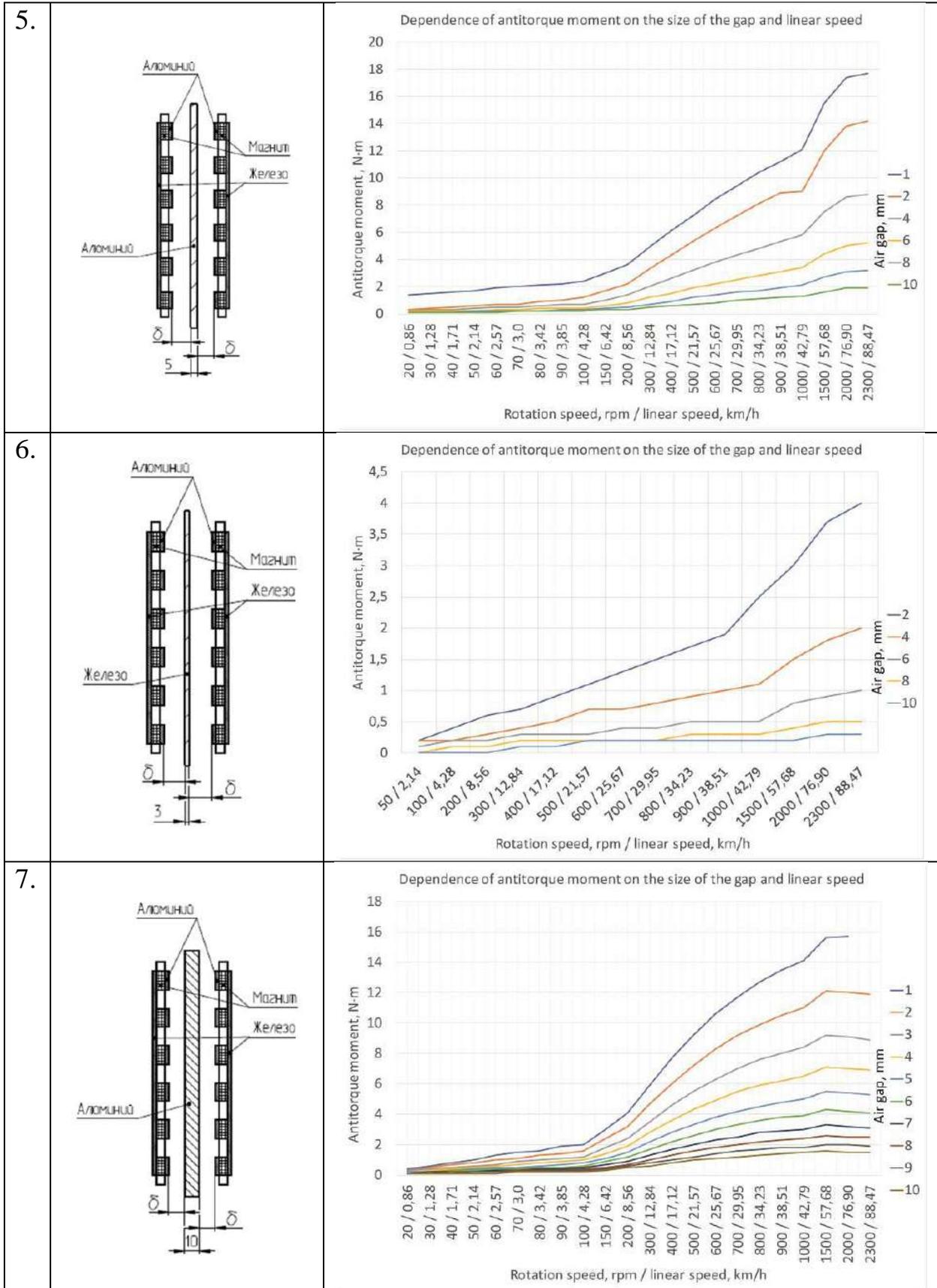


3.



4.





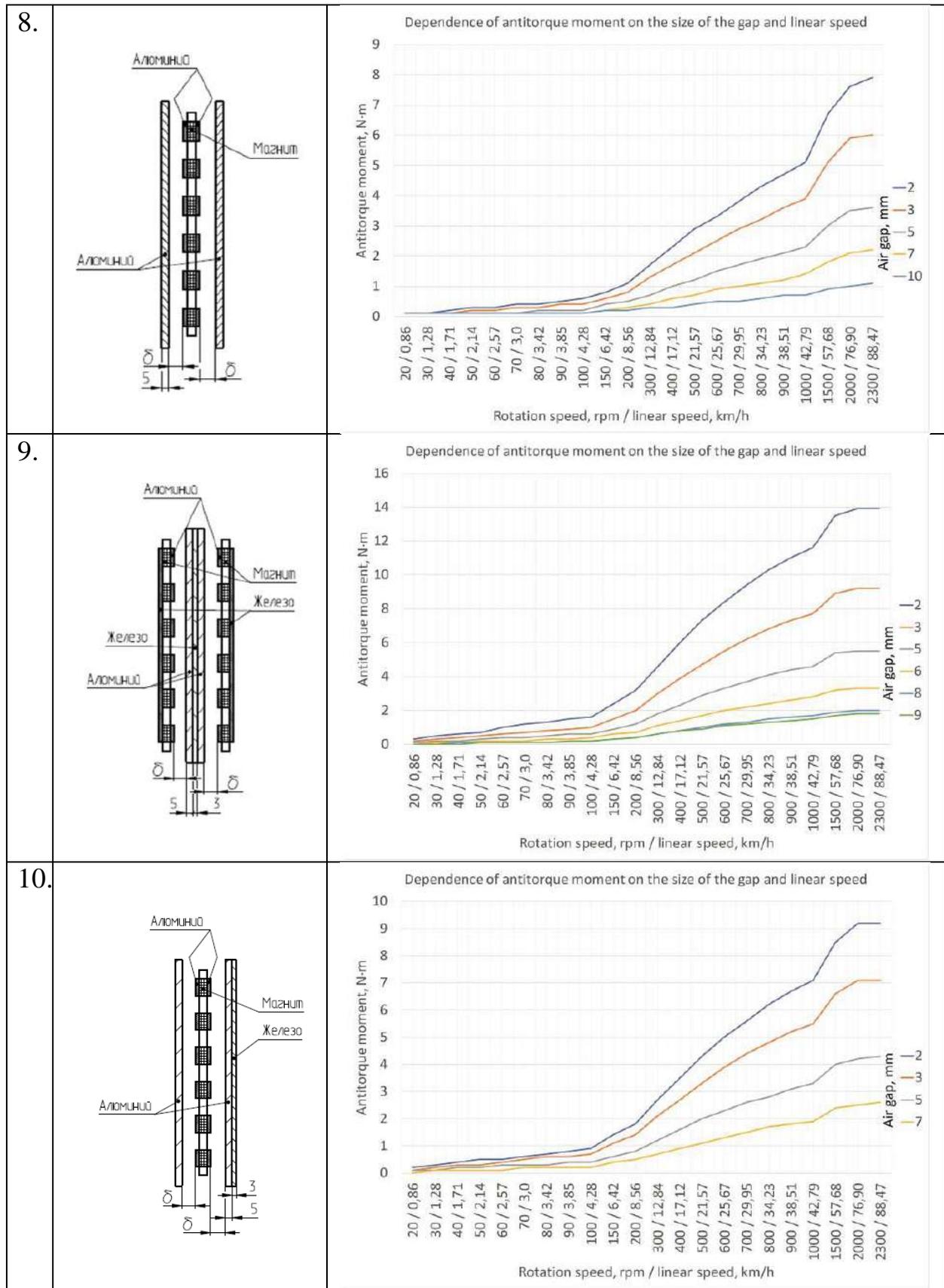


Рис. 2. Схемы и результаты исследования опытных образцов

В ходе исследований установлено, что величина момента сопротивления вращению значительно зависит от величины воздушного зазора между дисками и частоты вращения диска-шины и остается неизменной при повышении температуры диска-шины вплоть до +150 °С.

Результаты проведенных исследований показали, что максимальное удельное тормозящее усилие (в пересчете на 1 кг магнитов) получено на тестовом образце № 10 (с одной магнитной сборкой и двумя шинами), а максимальное абсолютное значение тормозящего усилия было получено на образце № 7 (с одной шиной и двумя магнитными сборками), компоновку которого целесообразно применять в дальнейшей разработке опытного образца секции ВТЗ.

Согласно данным протокола испытаний построены графики зависимости момента сопротивления вращению от величины зазора и скорости, которые показали, что при увеличении частоты вращения более 1500 об./мин. (линейная скорость 58 км/ч) тормозящее усилие выходит на «плато» (Рис. 2.7). Результаты исследований подтверждено, что при минимальных воздушных зазорах и прочих равных условиях медный диск-шина работает более эффективно, чем алюминиевый диск-шина, но на алюминиевой шине замечено, что характеристика нарастания тормозящего момента более пологая.

При сравнительном анализе секция ВТЗ с шиной из меди создает тормозящий момент на 15 % выше, чем секция ВТЗ с шиной из алюминия при тех же условиях эксплуатации. Однако, медная шина в несколько раз тяжелее, дороже алюминиевой и со временем на воздухе окисляется.

С целью минимизации массы рельсового электромобиля, снижения стоимости систем вихретокового замедления, следует отдавать предпочтение шине из более легкого металла с более пологой характеристикой нарастания тормозящего усилия от скорости, что предпочтительнее для достижения требуемых показателей разрабатываемой секции ВТЗ.

На основании полученных результатов, авторами была выбрана компоновка магнитной системы № 7 для разработки секции ВТЗ № 1 (с классической компоновкой магнитов) с алюминиевой шиной.

## КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ТЕСТОВЫХ ОБРАЗЦОВ

Для подтверждения экспериментальных данных тестовых образцов были проведены предварительные расчеты в программном комплексе ANSYS Maxwell 3D [15], построена компьютерная модель тестовых образцов и проведена ее валидация.

Математическая основа ANSYS Maxwell – метод конечных элементов, задача которого заключается в нахождении единственно возможного распределения электромагнитного поля в заданной расчетной

области при указанных граничных условиях и возбуждении. Применили параметрическую модель, в которой обозначен полный перечень параметров, влияющих в различной степени на величину тормозного усилия и соответственно на эффективность ВТЗ.

Тип расчета (Solution type) – динамический (transient).

В расчетной модели выделены четыре «домена»:

- *Base* – домен, соответствующий телу шины, в которой возникают вихревые токи при движении магнитного поля; неподвижен в процессе расчета, сетка постоянна;
- *Magnet* – домен, соответствующий магнитной сборке; состоит из магнитов; в процессе расчета движется в объеме домена *Band*, сетка постоянна;
- *Band* – домен, в объеме которого происходит движение домена *Magnet*; на каждом шаге расчета в объеме происходит перестроение конечно-элементной сетки; границы домена не должны пересекаться с доменами *Magnet* и *Base*;
- *Region* – домен «дальнего поля»; создается специальной вставкой.

Каждому объему можно задать свой материал (Assign material).

Материал шины по умолчанию – алюминий.

Для задания поступательного движения добавлены граничное условие MotionSetup, где задана скорость  $V$ , а в случае учета механики движения – начальная скорость  $V$ , масса тела, демпфирование и движущая сила при их наличии.

Кроме этого, обязательно установлен для домена *Base* эффект вихревых токов (Set Eddy Current).

В качестве результатов расчета на каждом шаге можно вывести плотность вихревых токов в теле шины (Рис. 3), величину электромагнитной индукции в векторной форме или в виде изополей (Рис. 4).

1. Для практического использования наибольший интерес представляют графики тормозящего усилия, которое приводит к падению скорости движения элементов домена *Magnet* (Рис. 5, 6). Данные результаты позволяют в дальнейшем получить зависимости суммарного тормозного усилия магнитной сборки от относительной скорости движения, что в свою очередь позволяет рассчитать динамику торможения юнимобиля с помощью ВТЗ, спроектированного на базе рассчитанных магнитов и шины [16, 17].

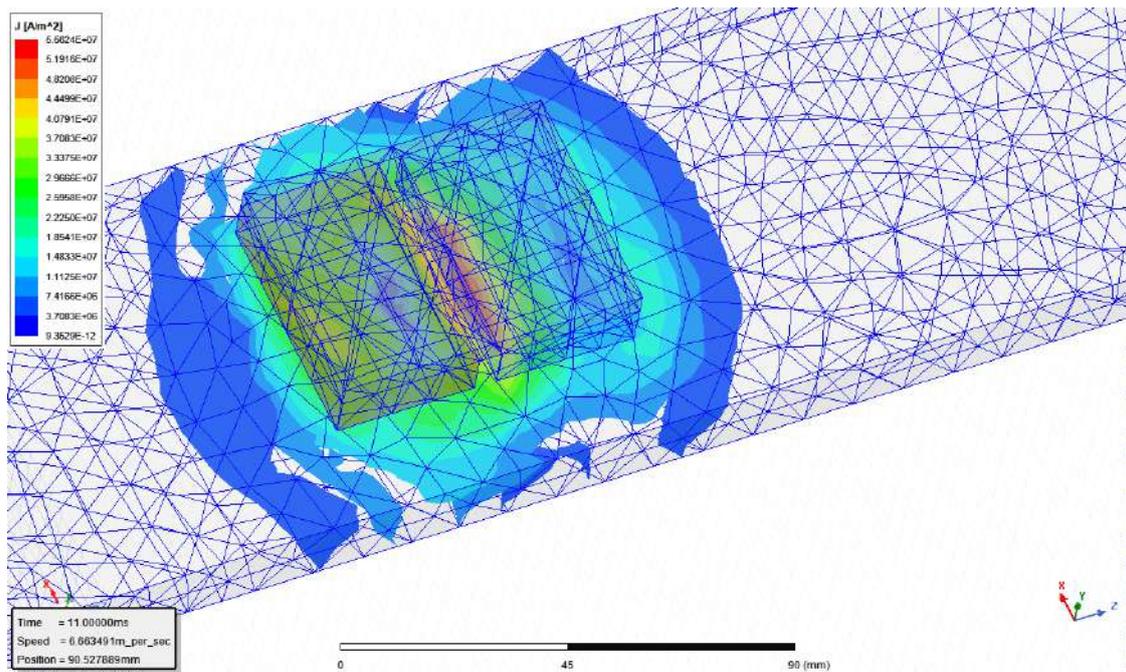


Рис. 3. Плотность вихревых токов в теле алюминиевой шины (в  $A/m^2$ )

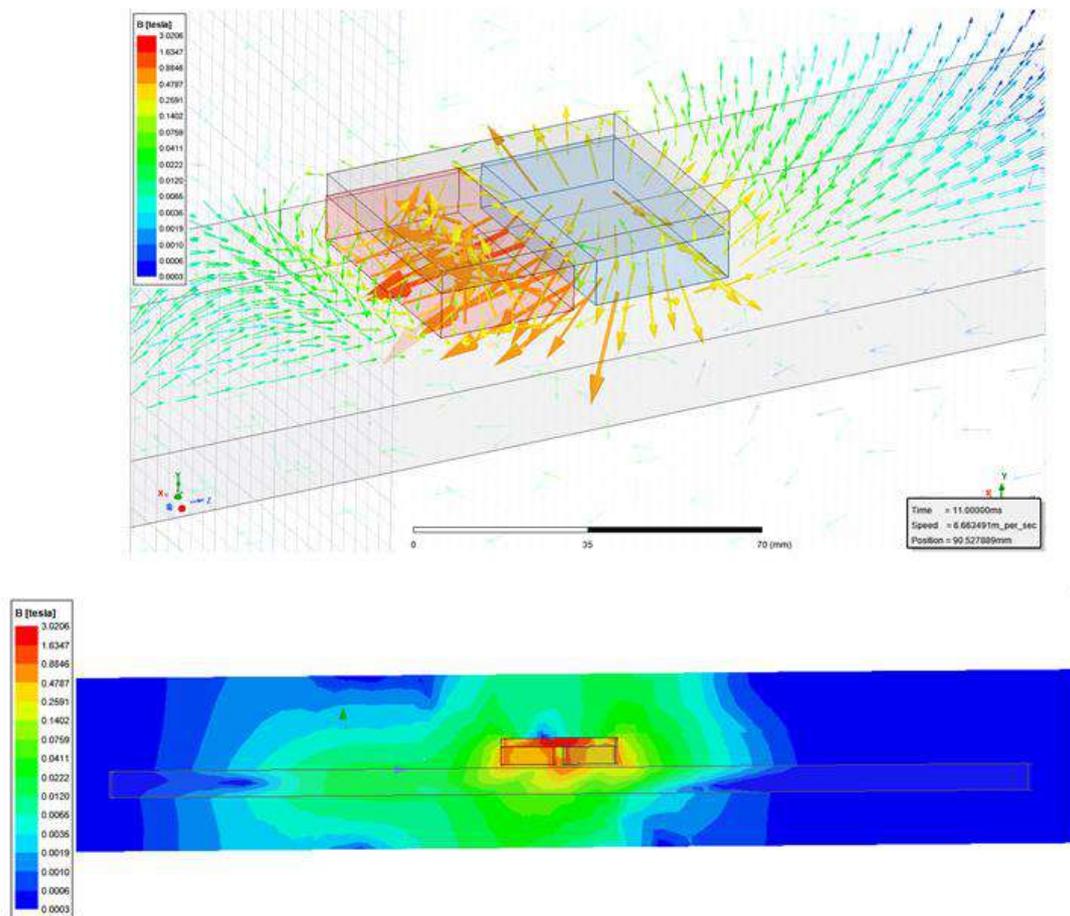


Рис. 4. Распределение электромагнитной индукции (в Тл)

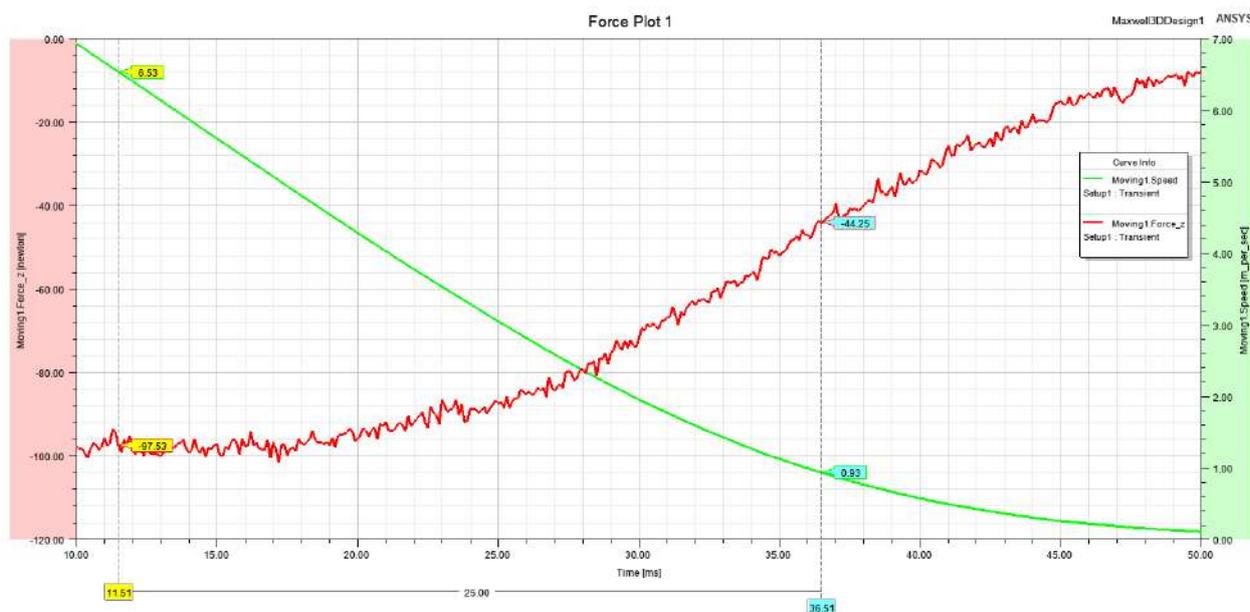


Рис. 5. График тормозного усилия (в Н, красный) и скорости движения (в м/с, зеленый) от времени динамического процесса (в мс)

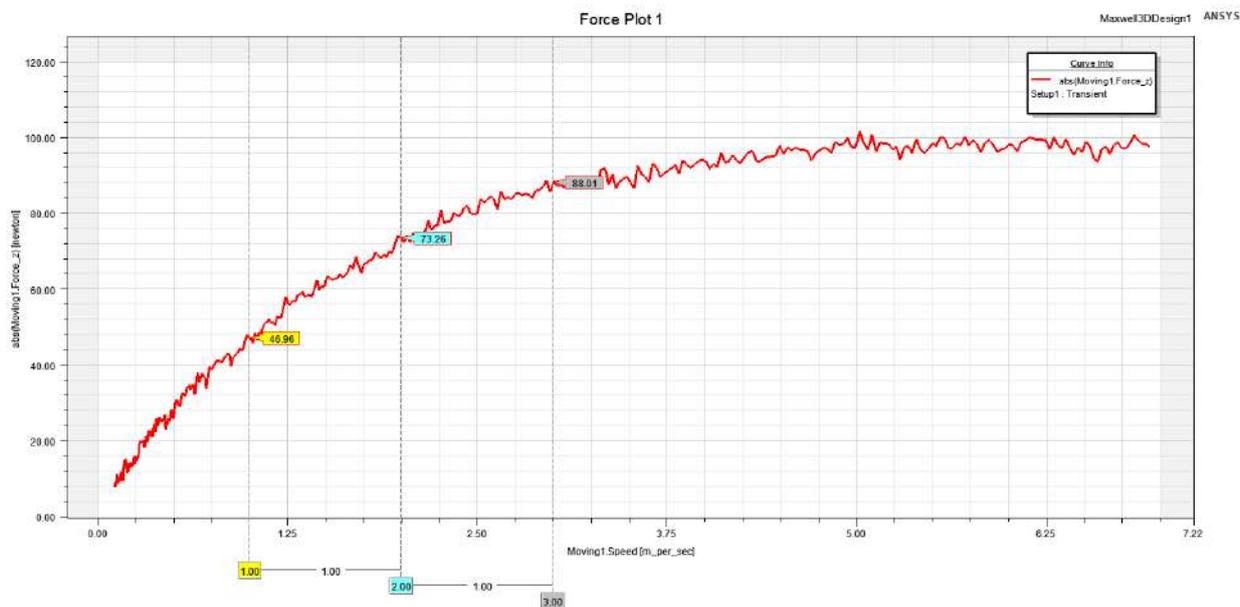


Рис. 6. Обработка данных в постпроцессоре

График тормозного усилия (в Н) от скорости движения (в м/с), который необходим для расчёта динамики торможения посредством ВТЗ на базе рассчитанного сочетания «магниты-шина».

На основании полученных результатов были сконструированы два варианта компоновки опытных образцов секций ВТЗ, приведенные на Рис. 7:

- опытный образец № 1, магнитная сборка в котором размещена на подвижной каретке, а шина размещена на стационарной колонне;
- опытный образец № 2, магнитная сборка в котором установлена на стационарной колонне, а шина закреплена на подвижной каретке с механизмом поджима шины к магнитной сборке.

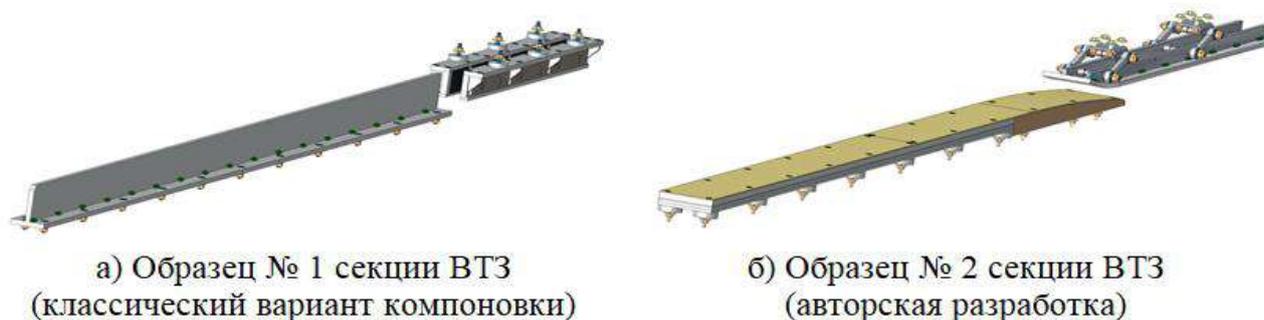


Рис. 7. Опытные образцы секции ВТЗ

На основании полученной компьютерной модели провели математический расчет компоновки опытных образцов № 1 и № 2 секции ВТЗ с последующей валидацией по результатам испытаний рассчитанных, спроектированных и изготовленных опытных образцов секции ВТЗ.

Далее были проведены испытания опытных образцов и оценены технические характеристики обоих вариантов компоновки ВТЗ, определена зависимость тормозящего усилия от массы подвижной части и линейной скорости.

В результате проведенных исследований было выявлено, что в образце № 1 все 12 магнитов одновременно участвуют в процессе создания тормозящего усилия на всем тормозном участке длиной 2 м, а в образце № 2 – в процессе создания тормозящего усилия участвует группа из семи магнитов, расположенных напротив движущейся каретки с шиной, при этом тормозной путь равен 1,5 м.

Таким образом, образец № 1, представляющий собой магнитную сборку, размещенную на подвижной каретке, и шину, размещенную на стационарной колонне, развивает большее удельное тормозящее усилие, благодаря одновременному участию всех магнитов. Однако, такая компоновка магнитов очень чувствительна к точности позиционирования подвижной части ВТЗ относительно стационарной части ВТЗ. Величина воздушного зазора для нормальной работы составляет 5–7 мм. Данный

зазор с требуемой точностью сложно обеспечить для крупногабаритных транспортных средств. Поэтому, для транспортных комплексов второго уровня предпочтительнее применение ВТЗ образца № 2, который обеспечивает стабильную работу, не предъявляя повышенных требований к точности позиционирования транспортного средства.

## ВАЛИДАЦИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

Валидация (определение степени соответствия расчетной модели реальному физическому объекту) проведена для обоих опытных образцов секции ВТЗ. На Рис. 8 приведены графики величин, полученные экспериментальным путем (обозначены TEST) и по результатам моделирования в программе ANSYS Maxwell 3D (обозначены MAXWELL 3D) для образца № 2.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод что компьютерные модели в достаточной степени точно отражают поведение реальных физических моделей, а примененное программное обеспечение ANSYS Maxwell 3D и настройки решения могут быть в дальнейшем использованы, в частности, для проведения подобных виртуальных тестов без надобности трудоемких и дорогостоящих натуральных экспериментов, и в общем, для разработки методики по проектированию и расчёту систем вихретокового замедления.

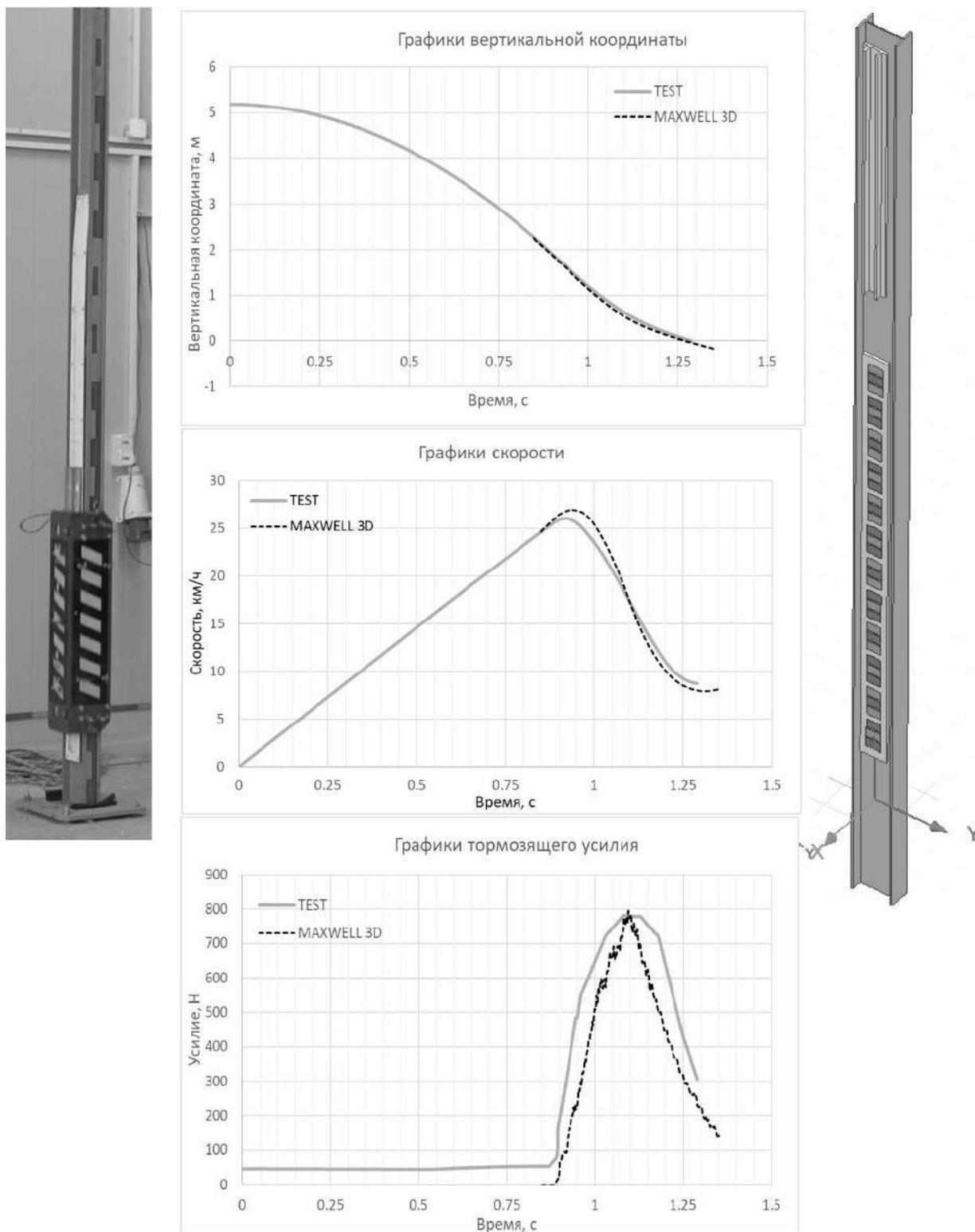


Рис. 8. Сравнение результатов эксперимента и моделирования ВТЗ

Ось абсцисс на графиках – время в секундах на основании файла Образец 2\_C0001.txt при падении каретки с высоты 5,2 метра, магнитная сборка из 36 магнитов 50x30x10 закреплена на стойке.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований показали, что максимальное удельное тормозящее усилие получено на тестовом образце № 10, а максимальное абсолютное значение тормозящего усилия было получено на образце № 7.

На основании вышесказанного были спроектированы 2 опытных образца секции ВТЗ: с классической компоновкой магнитной системы (Образец № 1) и с механизмом поджима шины (Образец № 2).

Было выполнено компьютерное моделирование опытных образцов секции ВТЗ с применением программного пакета конечно-элементного анализа ANSYS Maxwell. Проведена валидация компьютерного моделирования, погрешность по тормозящему усилию составила не более 3 %, что позволяет утверждать о хорошей достоверности получаемых результатов.

Таким образом, в результате проведенных исследований был разработан, подтвержден расчетами и натурными испытаниями авторский энергонезависимый ВТЗ, конструкция которого обеспечивает стабильную работу без предъявления повышенных требований к точности позиционирования транспортного средства «второго уровня» uST.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают особую благодарность генеральному директору ЗАО «Струнные технологии» Н.Г. Косаревой за финансовую поддержку при проведении экспериментов.

### Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Юницкий А.Э. Транспортные системы «второго уровня»: современное состояние и перспективы развития / А. Э. Юницкий, С. В. Артюшевский, Д. И. Бочкарев // Горная механика и машиностроение. – 2022. – № 4. – С. 39 – 56.
2. Юницкий А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе: / под.ред. А.Э. Юницкого. – Силагрос: ПНБ, 2019. [Unitsky AE. Strunnye transportnye sistemy: na Zemle i v Kosmose. Unitsky AE. editor. Silagros:PNB; 2019. 576 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 14.06.2023. Доступно по: [https://unitsky.engineer/assets/files/shares/2019/2019\\_26ru.pdf](https://unitsky.engineer/assets/files/shares/2019/2019_26ru.pdf)
3. Karakoc K, Park EJ, Suleman A. Improved braking torque generation capacity of an eddy current brake with time varying magnetic fields: a numerical study. *FiniteElem.Anal.Des.* 2012;(59):66-75. doi: 10.1016/j.finel.2012.05.005

4. Sinha G, Prabhu SS. Analytical model for estimation of eddy current and power loss in conducting plate and its application. *Phys.Rev.Spec.Top.:Accel.Beams*. 2011;14(6):062401-1-10. doi: 10.1103/physrevstab.14.062401
5. Karakoc K, Sauleman A, Park JE. Analytical modeling of eddy current brakes with the application of the time varying magnetic fields. *Applied Mathematical Modelling*. 2016;(40):1168-1179. doi: 10.1016/j.apm.2015.07.006
6. Niu B, Wang D, Pan P. Multi-objective optimal design of permanent magnet eddy current retarder based on NSGA-II algorithm. *Energy Reports*. 2022;(8):1448-1456. doi: 10.1016/j.egyr.2021.11.165
7. Eddy-current brakes of rail transport [Internet]. [cited 2021 August 9]. Available from: [http://www.ipem.ru/files/files/tzd\\_web\\_versions/tzd\\_32\\_web\\_full.pdf](http://www.ipem.ru/files/files/tzd_web_versions/tzd_32_web_full.pdf)
8. Forrister, T. Eddy current braking systems as a way to get rid of friction in rail transport [Internet]. [cited 2021 August 16]. Available from: <https://www.comsol.ru/blogs/how-eddy-current-braking-technology-is-freeing-us-from-friction/>
9. Озолин А.Ю. Торможение машин системами с постоянными магнитами: дис. канд. техн. наук. – СПб; 2009. – 19 с. [Ozolin AYu. Tormozhenie mashin sistemami s postoyannymi magnitami [dissertation]. St. Petersburg; 2009. 19 p. (In Russ.)].
10. Simeu E, Georges D. Modeling and control of an eddy current brake *Control Engineering Practice*. 1996;4(1):19-26. doi.org:10.1016/0967-0661(95)00202-4
11. Canova A, Vusini B. Analytical modeling of rotating eddy-current couplers, *IEEE Transactions on Magnetics*. 2005;41(1):24-35. doi.org: 10.1109/tmag.2004.839730
12. Shin K.-H, Park H.-I, Cho H.-W, Choi J.-Y. Semi-three-dimensional analytical torque calculation and experimental testing of an eddy current brake with permanent magnets, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2018;28(3):1-5. doi: 10/1109/tasc.2018.2795010
13. Linear Magnetic Brakes [Internet]. [cited 2022 September 16]. Available from: <https://www.h2wtech.com/page/linear-magnetic-brakes>
14. Lu X, Li Y, Wu M, et al. Rail temperature rise characteristics caused by linear eddy current brake of higt-speed train. *J of Traffic and Transportation Eng*. 2014;1(6):448-456. doi: 10.1016/s2095-7564(15)30295-6
15. User's guide – Maxwell 3D, 2005, Ansoft Corporation. [cited 2023 June 6]. Available from: [http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell3D\\_V11.pdf](http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell3D_V11.pdf)

#### Сведения об авторах:

**Юницкий Анатолий Эдуардович**, председатель совета директоров и генеральный конструктор ЗАО «Струнные технологии» и ООО «Астроинженерные технологии», eLibrary AuthorID: 534122, ORCID: 0000-0003-1574-3539;  
E-mail: a@unitsky.com

**Кузьмин Игорь Александрович**, ведущий инженер-конструктор ЗАО «Струнные технологии»; ORCID: 0000-0002-7521-9184;  
E-mail: i.kuzmin@unitsky.com

**Попко Сергей Сергеевич**, инженер ЗАО «Струнные технологии»;  
ORCID:0009-0007-1997-6838;  
E-mail: s.popko@unitsky.com

**Лобазова Ирина Евгеньевна**, к.х.н; ведущий специалист по научным разработкам и исследованиям ООО «Астроинженерные технологии»;  
eLibrary AuthorID: 600280, ORCID: 0000-0002-2796-3582;  
E-mail: i.lobazova@aet.space

**Information about the authors:**

**Anatoli E. Unitsky** Chairman of the Board of Directors, General Designer of Astroengineering Technology LLC and Unitsky String Technologies Inc.  
eLibrary AuthorID: 534122, ORCID: 0000-0003-1574-3539;  
E-mail: a@unitsky.com

**Igor A. Kuzmin**, Leader design engineer, UST Inc.  
ORCID: 0000-0002-7521-9184;  
E-mail: i.kuzmin@unitsky.com

**Sergey S. Popko**, Engineer, UST Inc. ORCID:0009-0007-1997-6838  
E-mail: s.popko@unitsky.com

**Iryna E. Labazava** PhD (Chemistry), Head of R&D Astroengineering Technology LLC;  
eLibrary AuthorID: 600280, ORCID: 0000-0002-2796-3582;  
E-mail: i.lobazova@aet.space

**Цитировать:**

Юницкий А.Э, Кузьмин И.А, Попко С.С, Лобазова И.Е. Разработка вихретоковых замедлителей для транспортных комплексов «второго уровня» uST // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2023. – Т. 9. – № 3. – С. 41–58. doi: 10.17816/transsyst20239341-58

**To cite this article:**

Unitsky AE, Kuzmin IA, Popko SS, Labazava IE. Development of eddy-current decelerators for uST transport complexes of the “second level”. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2023;9(3):41-58. doi: 10.17816/transsyst20239341-58